

Les résultats cosmologiques de la mission Planck

Nabila Aghanim et Hervé Dole (herve.dole@ias.u-psud.fr)

Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay (UMR8617, CNRS et Université Paris-Sud),
91405 Orsay Cedex

Membres de la collaboration Planck

L'histoire de l'Univers, telle qu'appréhendée par les cosmologistes, qu'ils soient observateurs, expérimentateurs ou théoriciens, est relativement bien décrite par le « scénario du Big Bang » qui, bien que contenant des variantes et des imperfections, satisfait un grand nombre de tests d'observation. Ce « modèle cosmologique standard » s'est enrichi avec le temps, nourri à la fois de nouvelles données précises et de prédictions plus complexes. L'histoire de la genèse et l'évolution des structures cosmiques (galaxies, amas de galaxies). Dès lors, les chercheurs cherchent à mettre au défi les variantes du modèle, en effectuant des mesures de nature à exclure certaines de ses variantes. L'une des observables majeures de la cosmologie est le rayonnement fossile – fond diffus cosmologique, en anglais Cosmic Microwave Background (CMB, acronyme que nous utiliserons dans la suite) découvert en 1964 par A. Penzias et R.W. Wilson. Les faibles inhomogénéités acoustiques (et les oscillations de température du CMB, i.e. les zones du ciel avec des brillances ou des températures différentes de la moyenne par moins de 0,001%, mises en évidence pour la première fois en 1992 par le satellite COBE de la NASA, sont reliées aussi bien, en aval, aux germes ayant donné naissance aux galaxies que, en amont, aux processus physiques de l'Univers primordial.

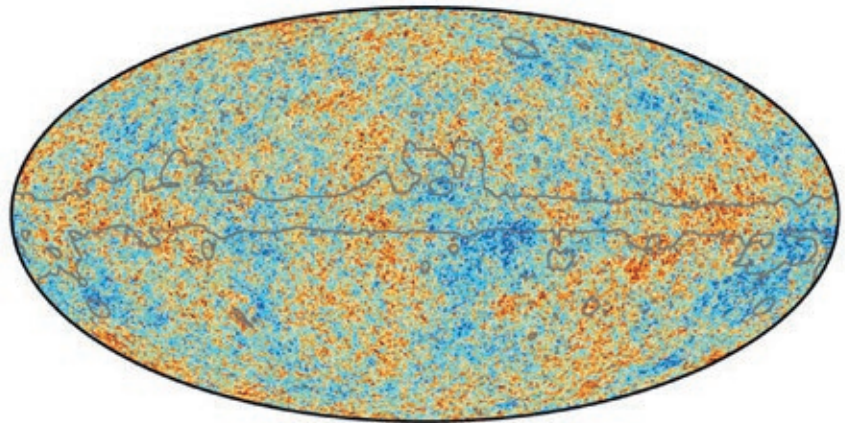
Le fond cosmologique et ses inhomogénéités

Dans cet Univers primordial très dense et chaud sous la forme d'un plasma, la lumière ne pouvait pas se propager librement. L'Univers était opaque, comme au centre

La mission Planck

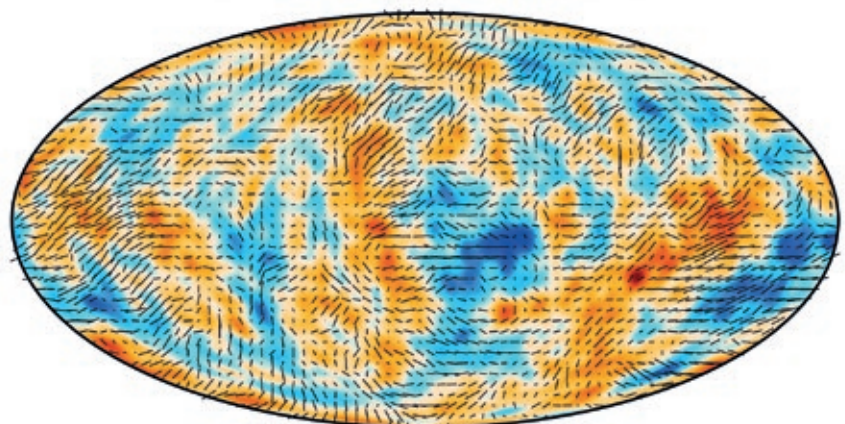
Décidé par l'Agence spatiale européenne (ESA) en 1996 (après une longue préparation sous la direction d'une équipe de l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS) d'Orsay menée par Jean-Loup Puget, avec plusieurs laboratoires français, le CNES, et une contribution significative de la NASA), le satellite Planck est lancé en mai 2009. C'est presque dix ans après le lancement du satellite américain WMAP (pourtant décidé la même année que Planck), parce

que la lumière et la matière sont couplées, mais la matière subit des perturbations. La compétition entre la gravité (qui domine la dynamique de croissance des perturbations) et la pression des photons piégés par leurs interactions avec la matière, génère des oscillations : des ondes acoustiques (analogues aux ondes sonores) qui se propagent dans le plasma. Sous l'effet conjugué de l'expansion de l'Univers et de la (re)combinaison graduelle entre électrons et protons pour former des atomes d'hydrogène, le libre parcours moyen des photons dans le plasma croît. Lorsque les photons dans le plasma croît. Lorsque l'Univers devient neutre, environ 375 000 ans après le Big Bang (soit un décalage spectral vers le rouge de $1090 \pm 2,5$ précisément), la matière et les photons se découplent. La lumière est alors libre de se propager jusqu'à nous : c'est le CMB.



(a)

-300 μ K 300 μ K



(b)

-160 μ K 160 μ K

© ESA/Collaboration Planck.

que les stratégies technologiques étaient différentes. En effet, les Européens ont choisi une voie plus ambitieuse, donc plus coûteuse, longue et risquée, mais avec la clef des mesures et des résultats inégalés passables pour longtemps : la nouvelle technologie se base sur des détecteurs ultrasensibles – les bolomètres – refroidis à une température record de 0,1 kelvin. Ainsi, une seule année d'observation avec Planck équivaut à environ 1000 années d'observation de WMAP. Planck dispose de deux instruments : HFI (High Frequency Instrument) réalisé sous la maîtrise d'œuvre de l'IAS à Orsay et sous la responsabilité de J.L. Puget, et LFI (Low Frequency Instrument) réalisé sous responsabilité italienne.

Le satellite Planck a été pensé pour cartographier la totalité du ciel dans le domaine spectral millimétrique (0,3 à 11 mm), avec une résolution angulaire relativement élevée par rapport à la granularité du CMB.

Planck observe non seulement l'intensité mais également la polarisation du CMB et du rayonnement de notre Galaxie, avec

une stratégie d'observation permettant de caractériser avec précision et de contrôler les effets instrumentaux pouvant dégrader ou impacter le signal. Pour ce faire, Planck a développé une stratégie d'analyse (incluant un contrôle par simulation), afin d'extraire le signal du fond diffus cosmologique des nombreuses autres signaux astrophysiques.

Initialement, douze mois d'observations étaient prévus pour cartographier deux fois la totalité du ciel (soit deux relevés). Planck-HFI a finalement observé durant 29 mois et a réalisé cinq relevés complets grâce à la très grande stabilité de son système de refroidissement. Pour la première fois en cosmologie, en raison de la sensibilité exceptionnelle des détecteurs de Planck, la mesure des fluctuations du CMB n'est pas limitée par cette sensibilité, mais par notre capacité à bien séparer le fond cosmologique des émissions contaminantes d'avant-plan comme celles provenant de la lumière de notre Galaxie, des autres galaxies et des amas de galaxies. La qualité de cette « séparation des composantes astrophysiques » dépend non seulement de la qualité de mesure du CMB lui-même, mais aussi de celle des dits avant-plans.

Les cartes du fond cosmologique observé par le satellite Planck, après soustraction des avant-plans, dont la contribution de la Voie lactée (1,6% de la surface du ciel). (Figures tirées de "Planck 2018 results. I. Overview, and the cosmological legacy of Planck", accepté pour publication dans A&A).

(a) Anisotropies de l'intensité (température) du CMB, à la résolution maximale (5 minutes) et avec une sensibilité de quelques μ K. Les lignes grises délimitent les régions où l'émission d'avant-plan est substantielle. La couleur rouge correspond aux zones plus chaudes et la couleur bleue aux zones plus froides.

(b) Champ de polarisation du CMB, indiqué par des traits noirs de longueur variable, superposé à la carte de température (couleurs) lissée à une résolution réduite à 5 degrés.

Depuis 2010, la collaboration Planck analyse les données et publie les résultats associés dans la revue *Astronomy and Astrophysics*. La version intégrale et définitive de ces résultats a été publiée le 17 juillet 2018. Les données de Planck révèlent le CMB comme jamais vu auparavant, avec une bien meilleure sensibilité et résolution angulaire. L'image des inhomogénéités de température du CMB (g.1a) montre qu'elles ont une distribution en taille dominée par des motifs de l'ordre du degré (la longueur d'onde $\lambda \approx 10$ mm) dans le domaine des micro-ondes jusqu'à la première harmonique des ondes acoustiques, c'est-à-dire le premier pic acoustique. Mais surtout, Planck donne pour la première fois accès à la polarisation du CMB sur tout le ciel (g. 1b).



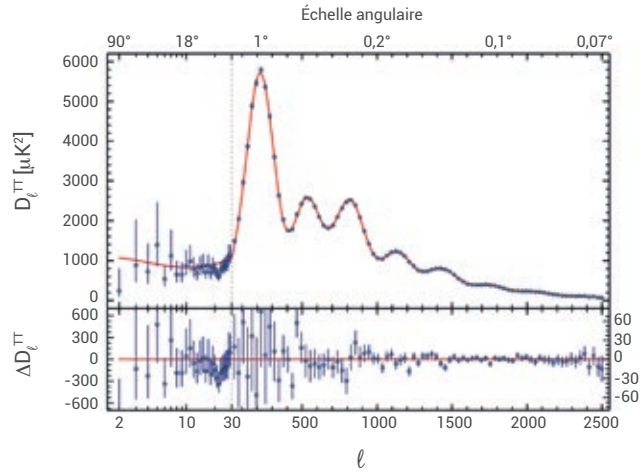
>>>
**Du fond diffus
 aux paramètres
 cosmologiques**

Les cosmologistes analysent les images du CMB avec un outil statistique privilégié – le spectre de puissance angulaire – qui fait office de mesure de corrélation à deux points dans toutes les directions. Dès lors, les spectres de puissance, données et modèles théoriques, sont directement comparables.

Grâce à son excellente résolution angulaire, Planck mesure dix-neuf harmoniques ou pics acoustiques des spectres de puissance des fluctuations de température (g. 2) et des fluctuations de polarisation E (g. 3) du CMB : une grande première.

L'importance que revêt cette mesure tient au fait que l'analyse du spectre de puissance du CMB permet de déterminer les paramètres « cosmologiques » qui décrivent le contenu de l'Univers en matière ordinaire et sombre, en neutrinos, en énergie sombre, notamment. Par exemple, la brillance des motifs de taille un degré (l'amplitude du premier pic acoustique) et leur taille angulaire dépendent respectivement de la densité totale d'énergie et de la courbure de l'Univers. Ou encore, la brillance relative des motifs de taille inférieure à un degré (amplitude relative des premier et deuxième pics) dépend de la quantité de matière ordinaire dans l'Univers. Dès lors, plus le spectre de puissance possède de pics acoustiques plus il est « complet » et meilleure sera la précision de la mesure des paramètres cosmologiques. Ces derniers nous révèlent l'ensemble des ingrédients cosmiques, exprimés en terme de leur rapport à la densité totale d'énergie dans l'Univers et notés W_b , W_{CDM} , W_n , W_L , les indices faisant référence à la matière baryonique (b), à la matière sombre (CDM pour cold dark matter), aux neutrinos (n) ou encore à l'énergie sombre (L). Les paramètres cosmologiques nous renseignent aussi sur les propriétés de l'Univers : son âge, à travers la constante de Hubble, qui mesure le rythme d'expansion de l'Univers, et sa géométrie, via son paramètre de courbure W_k , par exemple.

Les spectres de puissance de Planck sont comparés à des milliers de modèles reproduisant, en plus du CMB, tous les signaux mesurés par Planck comme les effets des amas de galaxies, des galaxies, de l'émission de notre Galaxie. On recherche alors l'ensemble des paramètres (cosmologiques, astrophysiques, instrumentaux) qui rendent

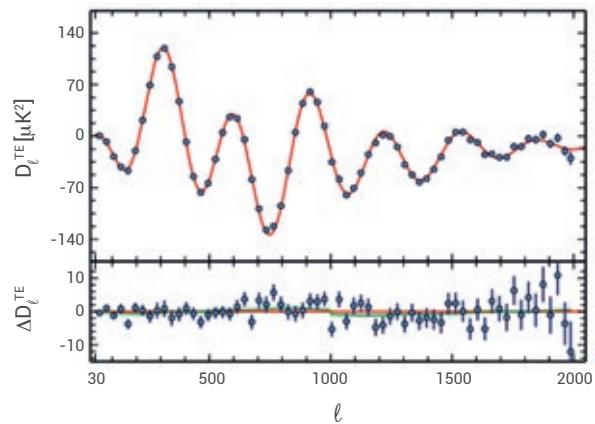
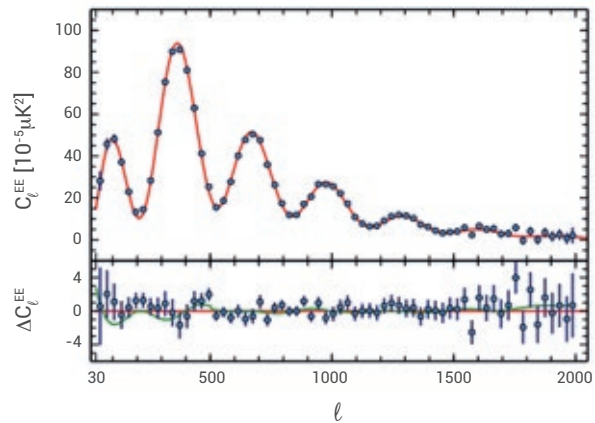


2. Spectre de puissance des fluctuations de température (en microkelvins carrés) du fond diffus cosmologique en fonction de l'échelle angulaire. Les moments multipolaires ℓ correspondant aux diverses échelles angulaires sont indiqués le long de l'axe des abscisses.

En haut du graphe : les données de Planck (points et barres d'erreur en bleu) et le meilleur modèle (courbe rouge).

L'insert du bas : résidus par rapport au modèle. Noter que le spectre de puissance est construit différemment pour le régime bas ℓ ($2 < \ell < 29$) et le régime haut ℓ ($\ell > 29$).

Figure tirée de Planck Collab. XIII, A&A 593 (2015) A13.)



3. Spectres de puissance du fond diffus cosmologique (a) en polarisation E (noté EE) et (b) en corrélation croisée température et polarisation E (noté TE). Mêmes notations que la figure 2.

(Figure tirée de Planck Collab. XIII, A&A 593 (2015) A13.)



L'inflation cosmique

le mieux compte du modèle complet du ciel étant données les observations. Seuls sont retenus les modèles, et par conséquent l'ensemble des paramètres, qui s'accordent au plus près avec les observations et les incertitudes.

Grâce à la qualité inégalée des données

de Planck, des mesures d'une précision jamais atteinte ont été obtenues pour les paramètres cosmologiques. Planck a révélé la « composition » de l'Univers. La quantité de matière ordinaire et de matière sombre doit être augmentée d'environ 10% rapport aux précédentes estimations. La quantité d'énergie sombre, quant à elle, a été diminuée d'autant. Le plus remarquable dans les plus récents résultats de Planck

est la précision extrême des mesures des paramètres, de l'ordre de 0,6 et 1,1 % pour les densités de baryons et de matière

sombre respectivement. Planck mesure le paramètre de courbure de l'Univers de l'ordre de $-0,004$ et établit donc que l'Univers est plat et que notre espace a une géométrie euclidienne. Les derniers résultats de Planck utilisant la polarisation du CMB confirment que la constante de Hubble mesurée, $67,27$ km/s/Mpc, est environ 10% plus faible que les précédentes estimations. La qualité des données de Planck, et l'accès aux nombreux pics acoustiques dans le spectre de puissance du CMB ont permis pour la première fois de détecter l'effet des neutrinos primordiaux, « émis lorsque l'Univers était âgé d'une seconde sur la carte du rayonnement fossile. Cet effet est en accord avec le scénario du Bang et le modèle standard de la physique

des particules. Planck montre bien que le nombre d'espèces de neutrinos est de trois tel que prédit par la théorie.

Avec cet ensemble de mesures qui lisent les spectres de puissance en température et en polarisation, il suffit de six paramètres cosmologiques pour ajuster parfaitement les dix-neuf pics. L'un des résultats majeurs de Planck est que le modèle cosmologique « standard le plus simple (appelé aussi « modèle de concordance ») est favorisé par les données et qu'aucune remise en cause profonde n'est envisageable, même si quelques tensions existent.

Une avancée majeure pour conforter le paradigme de l'inflation standard serait la mesure directe de la polarisation, dite de mode B

aux grandes échelles angulaires supérieures au degré. Cette polarisation est la signature claire des ondes gravitationnelles primordiales générées par la phase d'inflation cosmique.

La mesure représente la nouvelle limite imposée aux expériences visant à mesurer le CMB depuis le sol ou dans l'espace. L'importance que revêt la confirmation de la « phase d'inflation cosmique » par la mesure des modes B de polarisation impose une approche très sérieuse et prudente du traitement des données, en particulier de la séparation du signal cosmologique de celui associé à notre Galaxie. Ce type d'analyse poussée a été réalisé avec les données de Planck combinées

celles du télescope au sol BICEP2/KECK. Elle a mis en évidence que la part d'émission due à la poussière galactique avait été significativement sous-estimée, ce qui a conduit l'équipe BICEP à une interprétation erronée de leur signal comme étant un signal cosmologique. Aujourd'hui, l'analyse des données de Planck seules et celles combinées aux données de BICEP2/KECK indiquent que le paramètre mesurant l'importance du signal produit par les ondes gravitationnelles primordiales, correspond à une valeur supérieure – pas encore détectée. La quête de la trace des ondes gravitationnelles primordiales dans la polarisation du CMB ne fait que commencer.

En conséquence de l'inflation, est détectée. La quête de la trace des ondes gravitationnelles primordiales dans la polarisation du CMB ne fait que commencer.

Par ailleurs, et pour la première fois, Planck a permis la mesure non ambiguë de l'indice spectral scalaire $n_s = -0,9645$, avec une précision telle que l'écart à la valeur caractérisant le cas d'indépendance de la température (le physique) est indiscutable. Cette mesure est conforme aux prédictions de l'inflation de l'Univers est la « reionisation » qui désigne l'époque, quelques centaines de millions d'années après la recombinaison, de laquelle les atomes d'hydrogène sont de nouveau séparés en électrons et protons. L'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

Les observations du CMB apportent un éclairage unique et original sur la reionisation. En effet, celle-ci laisse une empreinte très caractéristique dans le CMB sous la forme d'un pic dans le spectre de puissance de la polarisation de type E aux très grandes échelles angulaires ($\ell > 100$).

Seules les observations de l'ensemble de la voûte céleste permettent d'accéder à ce signal. Par ailleurs et de nouveau, la séparation de l'émission polarisée de notre Galaxie est déterminante pour isoler le signal associé à la reionisation. En 2016 et grâce à une analyse particulièrement longue et détaillée de tous les effets instrumentaux intervenant aux grandes échelles angulaires, la collaboration Planck a pu mesurer l'opacité de l'Univers dû à la reionisation. La valeur obtenue ($\tau = 0,055 \pm 0,009$) permet de prédire que la reionisation s'est produite à un décalage vers le rouge entre 8 et 9. Les données de Planck indiquent aussi que le processus de reionisation n'a pas été très efficace avant un décalage spectral de 15. Ceci pourrait suggérer que les premières sources lumineuses qui se seraient formées

à l'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

Les observations du CMB apportent un éclairage unique et original sur la reionisation. En effet, celle-ci laisse une empreinte très caractéristique dans le CMB sous la forme d'un pic dans le spectre de puissance de la polarisation de type E aux très grandes échelles angulaires ($\ell > 100$).

Seules les observations de l'ensemble de la voûte céleste permettent d'accéder à ce signal. Par ailleurs et de nouveau, la séparation de l'émission polarisée de notre Galaxie est déterminante pour isoler le signal associé à la reionisation. En 2016 et grâce à une analyse particulièrement longue et détaillée de tous les effets instrumentaux intervenant aux grandes échelles angulaires, la collaboration Planck a pu mesurer l'opacité de l'Univers dû à la reionisation. La valeur obtenue ($\tau = 0,055 \pm 0,009$) permet de prédire que la reionisation s'est produite à un décalage vers le rouge entre 8 et 9. Les données de Planck indiquent aussi que le processus de reionisation n'a pas été très efficace avant un décalage spectral de 15. Ceci pourrait suggérer que les premières sources lumineuses qui se seraient formées

à l'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

Les observations du CMB apportent un éclairage unique et original sur la reionisation. En effet, celle-ci laisse une empreinte très caractéristique dans le CMB sous la forme d'un pic dans le spectre de puissance de la polarisation de type E aux très grandes échelles angulaires ($\ell > 100$).

Seules les observations de l'ensemble de la voûte céleste permettent d'accéder à ce signal. Par ailleurs et de nouveau, la séparation de l'émission polarisée de notre Galaxie est déterminante pour isoler le signal associé à la reionisation. En 2016 et grâce à une analyse particulièrement longue et détaillée de tous les effets instrumentaux intervenant aux grandes échelles angulaires, la collaboration Planck a pu mesurer l'opacité de l'Univers dû à la reionisation. La valeur obtenue ($\tau = 0,055 \pm 0,009$) permet de prédire que la reionisation s'est produite à un décalage vers le rouge entre 8 et 9. Les données de Planck indiquent aussi que le processus de reionisation n'a pas été très efficace avant un décalage spectral de 15. Ceci pourrait suggérer que les premières sources lumineuses qui se seraient formées

à l'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

celles du télescope au sol BICEP2/KECK.

Elle a mis en évidence que la part d'émission due à la poussière galactique avait été significativement sous-estimée, ce qui a conduit l'équipe BICEP à une interprétation erronée de leur signal comme étant un signal cosmologique. Aujourd'hui, l'analyse des données de Planck seules et celles combinées aux données de BICEP2/KECK indiquent que le paramètre mesurant l'importance du signal produit par les ondes gravitationnelles primordiales, correspond à une valeur supérieure – pas encore détectée. La quête de la trace des ondes gravitationnelles primordiales dans la polarisation du CMB ne fait que commencer.

En conséquence de l'inflation, est détectée. La quête de la trace des ondes gravitationnelles primordiales dans la polarisation du CMB ne fait que commencer.

Par ailleurs, et pour la première fois, Planck a permis la mesure non ambiguë de l'indice spectral scalaire $n_s = -0,9645$, avec une précision telle que l'écart à la valeur caractérisant le cas d'indépendance de la température (le physique) est indiscutable. Cette mesure est conforme aux prédictions de l'inflation de l'Univers est la « reionisation » qui désigne l'époque, quelques centaines de millions d'années après la recombinaison, de laquelle les atomes d'hydrogène sont de nouveau séparés en électrons et protons. L'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

Les observations du CMB apportent un éclairage unique et original sur la reionisation. En effet, celle-ci laisse une empreinte très caractéristique dans le CMB sous la forme d'un pic dans le spectre de puissance de la polarisation de type E aux très grandes échelles angulaires ($\ell > 100$).

Seules les observations de l'ensemble de la voûte céleste permettent d'accéder à ce signal. Par ailleurs et de nouveau, la séparation de l'émission polarisée de notre Galaxie est déterminante pour isoler le signal associé à la reionisation. En 2016 et grâce à une analyse particulièrement longue et détaillée de tous les effets instrumentaux intervenant aux grandes échelles angulaires, la collaboration Planck a pu mesurer l'opacité de l'Univers dû à la reionisation. La valeur obtenue ($\tau = 0,055 \pm 0,009$) permet de prédire que la reionisation s'est produite à un décalage vers le rouge entre 8 et 9. Les données de Planck indiquent aussi que le processus de reionisation n'a pas été très efficace avant un décalage spectral de 15. Ceci pourrait suggérer que les premières sources lumineuses qui se seraient formées

à l'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

Les observations du CMB apportent un éclairage unique et original sur la reionisation. En effet, celle-ci laisse une empreinte très caractéristique dans le CMB sous la forme d'un pic dans le spectre de puissance de la polarisation de type E aux très grandes échelles angulaires ($\ell > 100$).

Seules les observations de l'ensemble de la voûte céleste permettent d'accéder à ce signal. Par ailleurs et de nouveau, la séparation de l'émission polarisée de notre Galaxie est déterminante pour isoler le signal associé à la reionisation. En 2016 et grâce à une analyse particulièrement longue et détaillée de tous les effets instrumentaux intervenant aux grandes échelles angulaires, la collaboration Planck a pu mesurer l'opacité de l'Univers dû à la reionisation. La valeur obtenue ($\tau = 0,055 \pm 0,009$) permet de prédire que la reionisation s'est produite à un décalage vers le rouge entre 8 et 9. Les données de Planck indiquent aussi que le processus de reionisation n'a pas été très efficace avant un décalage spectral de 15. Ceci pourrait suggérer que les premières sources lumineuses qui se seraient formées

à l'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

Les observations du CMB apportent un éclairage unique et original sur la reionisation. En effet, celle-ci laisse une empreinte très caractéristique dans le CMB sous la forme d'un pic dans le spectre de puissance de la polarisation de type E aux très grandes échelles angulaires ($\ell > 100$).

Seules les observations de l'ensemble de la voûte céleste permettent d'accéder à ce signal. Par ailleurs et de nouveau, la séparation de l'émission polarisée de notre Galaxie est déterminante pour isoler le signal associé à la reionisation. En 2016 et grâce à une analyse particulièrement longue et détaillée de tous les effets instrumentaux intervenant aux grandes échelles angulaires, la collaboration Planck a pu mesurer l'opacité de l'Univers dû à la reionisation. La valeur obtenue ($\tau = 0,055 \pm 0,009$) permet de prédire que la reionisation s'est produite à un décalage vers le rouge entre 8 et 9. Les données de Planck indiquent aussi que le processus de reionisation n'a pas été très efficace avant un décalage spectral de 15. Ceci pourrait suggérer que les premières sources lumineuses qui se seraient formées

à l'émission de photons ionisants par les premiers objets lumineux (première génération d'étoiles, premières galaxies), même si d'autres hypothèses sont avancées comme la production de photons énergétiques et ionisants lors de la désintégration de particules de matière sombre.

Les observations du CMB apportent un éclairage unique et original sur la reionisation. En effet, celle-ci laisse une empreinte très caractéristique dans le CMB sous la forme d'un pic dans le spectre de puissance de la polarisation de type E aux très grandes échelles angulaires ($\ell > 100$).

>>>

>>>

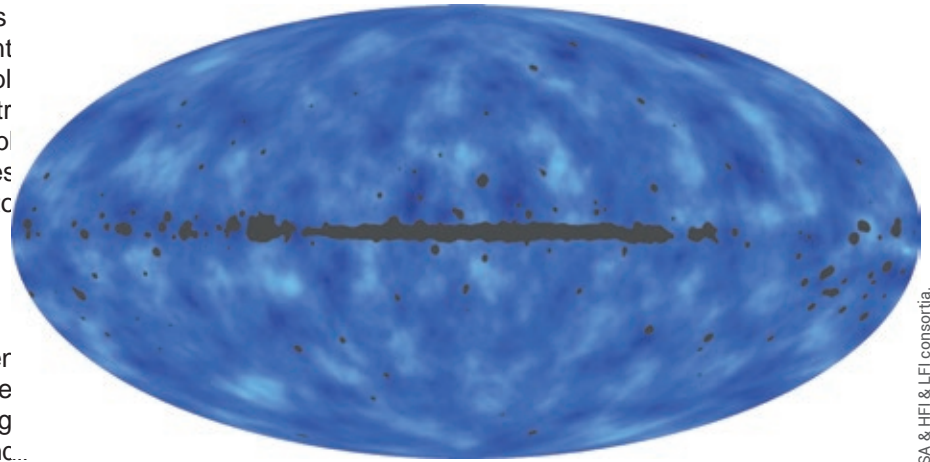
avant un décalage de 15 n'auraient pas libérer et cacement des photons ionisant Ces nouvelles mesures de Planck semblent confirmer les observations de galaxies très lointaines par le télescope spatial Hubble dont on pense qu'elles sont responsables l'émission de grandes quantités de photons ionisants.

Les grandes structures

Les perturbations initiales de densité générées aux premiers instants de l'Univers accrètent de la matière sous l'effet de la gravité et croissent. Elles continuent de grandir par fusions successives et s'organisent sous la forme d'un réseau de matière baryonique et de matière sombre. Lorsqu'elles sont assez denses, elles forment en leur sein les premières étoiles et donnent naissance aux premières galaxies, qui évoluent ensuite sous la forme de structures cosmiques complexes.

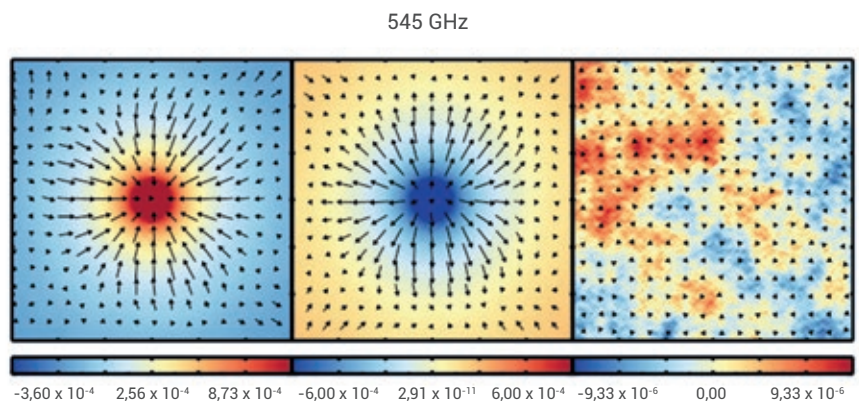
Il existe deux méthodes pour visualiser le réseau de filaments de matière sombre. La première consiste à observer comment les galaxies se distribuent dans l'espace (et dans le temps). La seconde consiste à identifier comment la gravité, induite par la matière sombre dans les filaments, courbe les rayons lumineux issus des galaxies distantes et distord leurs images. C'est l'effet de lentille gravitationnelle faible. Cet effet intervient aussi en distordant et lissant les motifs les plus petits (quelques minutes d'arc sur le ciel) de l'image du CMB utilisée comme lumière d'arrière-plan. Ces distorsions sont employées dans l'analyse des cartes du CMB effectuée par la collaboration Planck pour reconstituer la distribution sous-jacente de matière sombre. Grâce à l'effet de lentille gravitationnelle faible, Planck a permis pour la première fois de visualiser l'accumulation (sur la ligne de visée) de matière sombre sur la totalité du ciel (g. 4), et en a ainsi fourni une cartographie complète et une caractérisation de ses propriétés statistiques.

Cette carte représente en quelque sorte l'ensemble des écrans de matière sombre dans lesquels les galaxies vont se former et évoluer. On les désigne sous la terminologie de « puits de potentiel de matière sombre ». Le gaz des amas de galaxies va aussi s'agréger, pour y atteindre des températures extrêmes jusqu'à des centaines de milliers de degrés.



© ESA & HFI & LFI consortia.

Visualisation de la carte du fond diffus cosmologique. Ce potentiel est relié à la présence de matière sombre projetée sur la ligne de visée. Les régions avec plus de masse sont en couleur claire, celles avec moins de masse en foncé. (Figure tirée de Planck Collab. I, A&A 593 (2015) A1.)



© ESA & HFI & LFI consortia.

5. Visualisation dans l'espace réel de la corrélation entre le fond diffus infrarouge (FDI) de galaxies et le potentiel gravitationnel. Extraits de un degré carré de la carte des températures du fond diffus infrarouge mesurée à la fréquence 545 GHz de Planck-HFI, réalisés en superposant les zones centrées sur les 20 000 pics d'intensité les plus brillants (à gauche), les moins brillants (au milieu) ou choisies aléatoirement (à droite, pour s'assurer que la méthode n'induit aucun effet systématique). Les couleurs traduisent l'intensité de l'émission du fond diffus infrarouge, les flèches tracent par leur longueur et leur direction la déflexion par effet de lentille gravitationnelle sur le rayonnement fossile. On voit que les maxima de température du FDI (en rouge) défléchissent la lumière vers l'intérieur et correspondent donc à des puits de potentiel gravitationnels, alors que les minima de température (en bleu) correspondent à des maxima de potentiel. (Figure tirée de Planck Collab. XVIII, A&A 571 (2013) A18.)

Par ailleurs, la corrélation des cartes de matière sombre et de l'effet de lentille gravitationnelle et de l'émission du FDI (fond diffus infrarouge) représente l'ensemble de l'émission des galaxies de l'Univers le long de son histoire et trace la formation stellaire dans les grandes galaxies), toutes deux mesurées par Planck, illustre parfaitement la concomitance de la formation des étoiles dans les galaxies avec la présence d'une densité de matière sombre distordant le CMB (g. 5).



Les amas de galaxies

En n, l'analyse des images du FDI révèle des objets inconnus qui apparaissent « froids »

dans le jargon des astrophysiciens, c'est-à-dire présentent une émission spectrale décalée vers le rouge. Ces « points froids du FDI » pourraient être des proto-amas de galaxies (le chaînon manquant dans la formation des structures) ou des galaxies individuelles très fortement amplifiées par effet de lentille gravitationnelle. Dans les deux cas, ces objets se situeraient à des décalages spectraux supérieurs à 2. Un grand ensemble d'observations, notamment de l'observatoire européen spatial Herschel, a permis de prouver qu'en effet, sur des centaines d'objets « froids », certains se situent bien à des redshifts supérieurs à (g. 6).

La qualité des données de Planck nous permet donc de sonder aussi la formation des toutes premières structures individuelles et de compléter la « généalogie des galaxies et des amas.

Les galaxies se regroupent pour former des amas à l'intersection des laments du réseau cosmique. La matière ordinaire sous forme d'un gaz est chauffée à des températures de l'ordre de dizaines à centaines de millions de degrés dans les amas, et les photons du CMB interagissent avec ce gaz à l'entrée et à la sortie des amas qu'ils traversent. Ils acquièrent un peu plus d'énergie à leur entrée – l'effet dénommé « Sunyaev-Zeldovich effect » (SZ). Grâce à cette manifestation spectrale et caractéristique (voir l'encadré p. 10), Planck est particulièrement adapté pour la découverte des amas de galaxies. Une combinaison de techniques adaptées nous a permis à la collaboration Planck de mettre en évidence plus d'un millier d'amas de galaxies (dont plus de 500 nouveaux amas), ainsi que des super-amas. Environ vingt ans après le premier catalogue d'amas complet dans le domaine des rayons X – celui établi par ROSAT – les données millimétriques et submillimétriques ont révélé une population d'amas massifs jamais observés auparavant.

L'observation de ces amas permet de mieux comprendre leur physique, mais aussi de mesurer certains paramètres cosmologiques, puisque la formation de ces objets massifs y est très sensible. Avec un sous-échantillon de plusieurs centaines de ces amas, la collaboration Planck a obtenu les mesures les plus précises de ces paramètres, notamment la densité de matière et l'amplitude des perturbations initiales. De plus, pour la première fois, la mesure de l'effet SZ intégrée sur toute la sphère céleste, effectuée par Planck, a mis en évidence la contribution des amas non résolus. Avec ce signal intégré de l'effet SZ, les paramètres cosmologiques ont été contraints.

Cependant, les résultats obtenus avec les mesures SZ ne sont pas tout à fait en accord avec les paramètres cosmologiques issus de la mesure du CMB par Planck, en particulier l'amplitude des perturbations initiales. Cet écart n'est pas assez important pour remettre en cause fondamentalement le modèle, mais il est suffisamment grand pour provoquer un débat dans la communauté, car il ouvre la possibilité d'une mesure indirecte de la masse des neutrinos, ou d'une révision des estimations des masses des amas de galaxies.

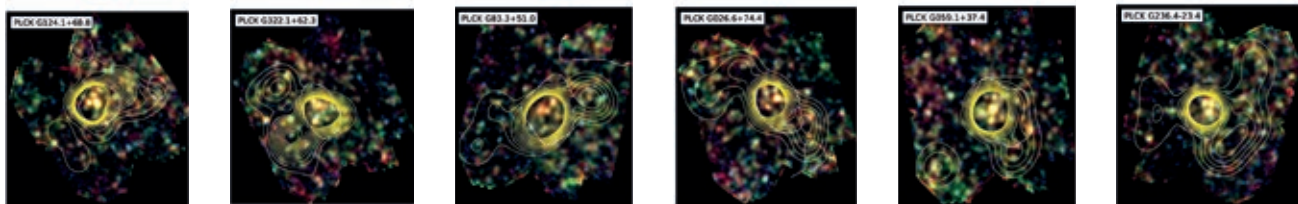
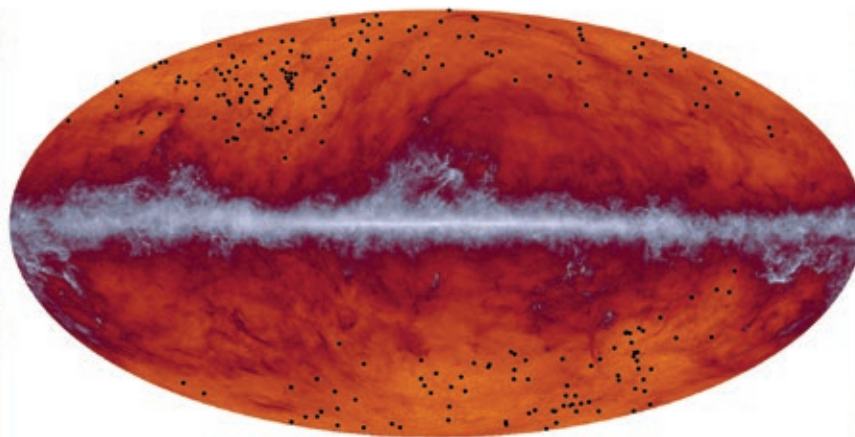


Figure 6. La bande blanche observée par Planck à la fréquence de 545 GHz (soit environ 550 μm de longueur d'onde). La bande blanche horizontale correspond aux poussières de la Voie lactée. Les points noirs indiquent la position des candidats observés ultérieurement par Herschel. En bas, les images de six de ces points froids, prises par l'instrument SPIRE de Herschel à 250, 350 et 500 μm de longueur d'onde, avec les contours de densité surfacique des galaxies observées. (Figure tirée de Planck Collab., Planck intermediate results, XXVII, A&A 582 (2015) 30).

© Dole, Guéry, Hurier, ESA, Planck Collab., HFI Consortium (IAS, ONES, Univ. Paris Sud, CNRS).

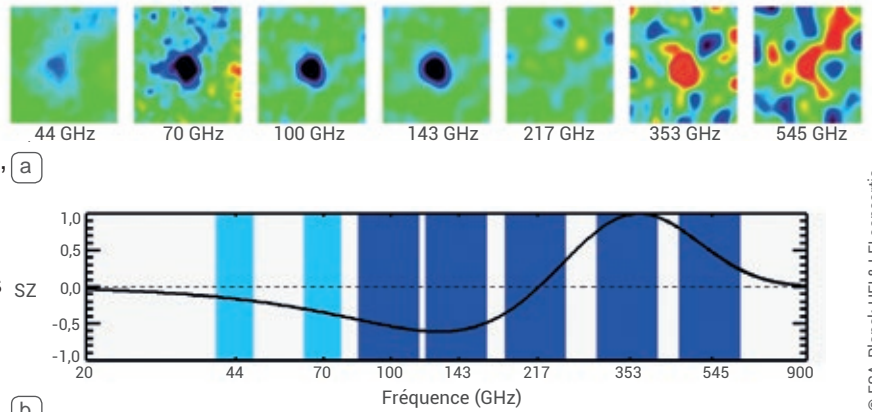
>>>

Conclusion

Grâce à sa cartographie complète du ciel à neuf longueurs d'onde et avec une résolution angulaire de 4,5 minutes d'arc, Planck, le satellite européen dédié à l'étude du fond diffus cosmologique, a ouvert une fenêtre d'observation complètement nouvelle entre 100 et 900 GHz (de 3 millimètres à 350 microns de longueur d'onde). Planck a permis de faire des avancées significatives dans de nombreux domaines de l'astrophysique et de la cosmologie. Il a révisé la détermination des paramètres cosmologiques comme la composition ou l'âge de l'Univers. Il a découvert des centaines de nouveaux amas, superamas et proto-amas de galaxies et des pouponnières d'étoiles. Finalement, Planck a permis d'établir solidement le paradigme de l'inflation, de sonder la réionisation et de vérifier la validité du scénario hiérarchique de formation des structures cosmiques.

L'effet Sunyaev-Zel'dovich

L'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ) provient de l'interaction (Compton inverse) entre les photons issus du fond cosmologique avec le gaz chaud présent à l'intérieur des amas de galaxies, provoquant de légers changements de fréquence des photons. L'effet SZ est très caractéristique car, observé aux fréquences inférieures à 217 GHz (soit 1,3 mm de longueur d'onde), l'amas de galaxies apparaît comme une zone donnée du ciel plus sombre que la moyenne (signal négatif), alors qu'il est plus brillant (signal positif) aux plus hautes fréquences (fig. E1). L'effet est nul à la fréquence 217 GHz, il n'y a alors pas de variation de brillance.



E1. (a) La frise d'images illustre l'effet SZ dans le cas d'un amas de galaxies connu et proche, Abell 2319. La variation de couleur due à cet effet est observée avec les deux instruments de Planck, LFI et HFI, de 44 à 545 GHz. Le signal négatif (zone sombre centrale) à basse fréquence est indiqué en bleu, alors que le signal positif (zone brillante centrale) à haute fréquence est indiqué en rouge. (b) Le schéma en bas de la figure montre la perte ou le gain en énergie, d'un point de vue théorique, dus à l'effet SZ (bandes de sensibilité de LFI à 44 et 70 GHz en bleu clair, bandes de sensibilité de HFI de 100 à 545 GHz en bleu foncé). L'accord entre prédiction et observation est remarquable.

Références

- Articles scientifiques de la collaboration Planck : www.cosmos.esa.int/web/planck/publications
- Site grand public en français, avec images et vidéos : www.planck.fr
- Productions scientifiques de la collaboration Planck : www.cosmos.esa.int/web/planck

(a) Conséquence directe de la dilatation de l'espace (l'expansion de l'Univers), les raies caractéristiques des éléments chimiques qui composent étoiles apparaissent à des longueurs d'onde décalées vers le rouge par rapport à celles qu'on leur connaît en laboratoire : c'est le décalage spectral (redshift), qui est d'autant plus grand que l'objet est plus éloigné de nous et que la lumière qui nous en parvient a été émise tôt dans l'histoire de l'Univers. Le décalage spectral est noté $z = (\lambda_{\text{reçu}} - \lambda_{\text{émis}}) / \lambda_{\text{émis}}$ entre les longueurs d'onde reçues et émises. Le décalage vers le rouge appliqué aux galaxies proches ($z < 0,02$) permet d'estimer la distance, en utilisant la relation de Hubble-Lemaître entre la distance et la vitesse radiale apparente des objets observés.

(b) Le fond diffus cosmologique est un rayonnement légèrement polarisé. L'origine est la diffusion. Quand un photon diffuse sur un électron, le premier ressort polarisé dans la direction orthogonale au plan de diffusion. La polarisation nette du CMB, qui résulte des gradients de vitesse dans le plasma, fournit un signal beaucoup plus faible que celui de sa température. Ce signal comprend deux termes, le mode E et le mode B, qui se distinguent par leur comportement vis-à-vis d'une réflexion miroir. Le mode E est invariant (c'est un scalaire) et B change de signe. Les fluctuations de densité ne produisent que le mode E, alors que les modes B ne peuvent être produits que par des sources tensorielles, telles que les ondes gravitationnelles. La polarisation B, considérablement plus faible que la polarisation E, n'a pas encore pu être mise en évidence expérimentalement (voir la section sur « L'inflation cosmique », p. 7).

(c) Pour quantifier les inhomogénéités de température du CMB, on le décompose dans la base des harmoniques sphériques à l'aide des Legendres. Si le CMB était a priori isotrope, il n'y a statistiquement aucune information dans l'indice l , et toute l'information se trouve dans les coefficients $C_l = C^2 / (2l+1)$. Le spectre de puissance angulaire des anisotropies de température du CMB est la distribution des valeurs des coefficients C_l . La décomposition de (moment multipolaire, inverse d'un angle), qui correspondent à des images ayant des résolutions spatiales de plus en plus grandes. Un pic dans la courbe du spectre de puissance angulaire indique qu'un type de structures ont la taille correspondante : le premier pic, situé vers $l \approx 200$ (correspond à la taille des petites taches visibles sur la figure 1a. La même méthode appliquée à la carte du champ de polarisation du CMB donne accès au spectre de puissance de polarisation E (g. 3a). En n, le spectre de puissance en corrélation croisée C^E (g. 3b) est obtenu à partir de la somme des produits C_{lm}^E .

(d) Les six paramètres du modèle de concordance (ou modèle Λ CDM, lambda dominated Cold Dark Matter) sont : la densité baryonique, la densité de matière sombre, l'âge de l'Univers, l'indice spectral des perturbations primordiales scalaires de densité, l'amplitude des fluctuations de courbure de l'Univers et l'épaisseur optique de réionisation.

(e) L'inflation est un modèle cosmologique selon lequel l'Univers a connu une expansion très brutale à ses tous premiers instants (à $t < 10^{-32}$ s). Le concept d'inflation offre une solution aux problèmes de l'horizon (homogénéité de l'Univers à très grande échelle) et de la platitude de l'Univers.

(f) L'indice spectral scalaire est la pente, en terme de loi de puissance dans l'espace de Fourier, du spectre des fluctuations primordiales de densité engendrées par l'inflation : $P_\delta(k) \propto k^{(n_s-1)}$. Un indice n_s égal à 1 signifie que les fluctuations ont un spectre identique à toute échelle.